

# Simulasi Numerik dengan Pendekatan 3D-URANS Aliran yang Melintasi Susunan Empat Silinder Sirkular Dekat Dinding pada “Small-Gap”

A. Grummy Wailanduw<sup>1\*</sup>, Triyogi Yuwono<sup>2</sup>, Wawan Aries Widodo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
Kampus UNESA Ketintang, Surabaya, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya  
Kampus ITS, Keputih, Sukolilo – Surabaya 60111, Indonesia

\*E-mail: grummy\_wailanduw@yahoo.co.id

## ABSTRAK

Aliran yang melintasi susunan empat silinder sirkular di *center line* telah banyak dilakukan, baik secara eksperimen, simulasi, maupun visualisasi. Fenomena aliran yang terjadi di sekeliling silinder berbeda, ketika susunan empat silinder sirkular tersebut diletakkan dekat dinding, terutama pada “small gap”. Pengaruh lapis batas dari dinding akan mempengaruhi aliran pada lower cylinder terutama *down-stream cylinder* yang sebelumnya hanya dipengaruhi oleh *up-stream cylinder*. Penelitian ini bertujuan untuk mengungkap fenomena aliran di sekeliling susunan silinder yang diletakkan sangat dekat dengan dinding tersebut. Metode simulasi numerik disini menggunakan bantuan *software* FLUENT 6.3.26, dan karakteristik aliran diteliti pada susunan empat silinder sirkular  $L/D = 4$  yang ditempatkan sangat dekat dinding dengan rasio  $G/D = 0,1$  dan  $G/D = 0,2$  dengan bilangan Reynolds  $5,3 \times 10^4$  berdasarkan diameter silinder. Dalam menentukan model viskos yang akan digunakan, dilakukan validasi antara hasil simulasi numerik yang menggunakan berbagai model viskos dan hasil eksperimen pada silinder sirkular tunggal yang ditempatkan di *center line*. Hasil validasi menunjukkan bahwa dari berbagai model viskos URANS yang telah dicoba, model viskos  $k-\omega$  sst memiliki hasil yang mendekati hasil eksperimen. Berdasarkan penelitian tersebut, diperoleh *pressure coefficient distribution* ( $C_p$ ) dari *upper cylinder* dan *lower cylinder* yang berbeda. Selanjutnya dari hasil simulasi ini juga dapat dilihat bahwa daerah di belakang silinder sirkular, antara *upper* dan *lower cylinder* terjadi perbedaan pola *vortex shedding* antara jarak kedua rasio tersebut.

**Kata kunci:** Simulasi numerik, 3D-URANS, susunan empat silinder sirkular, dekat dinding

## ABSTRACT

A flow cross four circular cylinders arrangement in center-line had been many investigated by an experimentally, a simulation, as well as a visualization. The flow phenomena around the cylinders were different when its arrangement were located near a wall, especially at small gap. A boundary layer of the wall would effected a flow characteristics around the cylinders. This research was done by numerical method with FLUENT 6.3.26 software at  $L/D = 4.0$  and  $G/D$  ratio 0.1 and 0.2 and Reynolds number 53000 based on the diameter of a single cylinder. An evolution of pressure distributions in circular cylinders, especially at the lower cylinders, are effected of a plane wall which located near them.

**Keywords:** Numerical simulation, 3D-URANS, four circular cylinders arrangement, near wall

## PENDAHULUAN

Aliran yang melintasi silinder sirkular dekat dinding banyak dijumpai dalam *aplikasi engineering*, seperti konstruksi sistem perpipaan di bawah laut, alat penukar kalor *shell and tube* atau *tube banks*. Ketika aliran melintasi silinder sirkular yang ditempatkan dekat dinding akan terbentuk suatu

pola aliran atau *flow pattern* yang tertentu sesuai dengan geometri kontur bodi, dan juga menimbulkan gaya-gaya aerodinamik, seperti *lift force* dan *drag force*, pada bodi. *Lift force* menyebabkan efek getaran atau vibrasi pada konstruksi sehingga dapat mengurangi kekuatan dari material tersebut, sementara *drag force* dikaitkan dengan suatu aliran dapat memperlambat atau mengurangi momentum

aliran tersebut. Gaya-gaya aerodinamik pada silinder sirkular ini terjadi sebagian besar karena dipengaruhi atau didominasi oleh *pressure forces*, sedangkan pengaruh *viscous forces* relatif kecil, terutama pada bilangan Reynolds yang cukup tinggi. Selain itu juga dipengaruhi oleh adanya *flow interference* akibat pola aliran yang terbentuk antara dinding dan silinder sirkular tersebut.

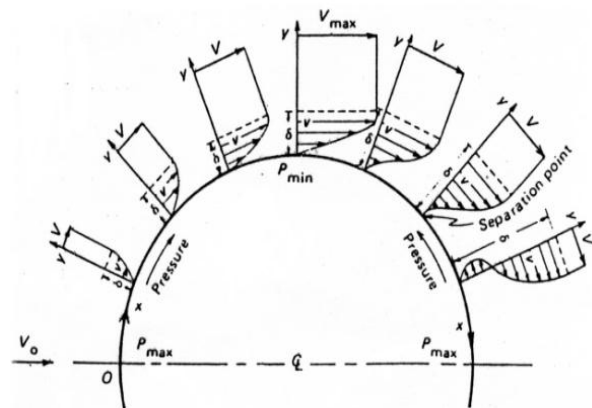
*Flow interference* adalah fenomena aliran yang terbentuk ketika aliran pada silinder sirkular dipengaruhi oleh aliran dinding tersebut. Fenomena *flow interference* ini sangat bergantung pada kecepatan *free stream* dan diameter silinder (bilangan Reynolds), dan sifat-sifat lapis batas, seperti jenis dan tebal lapis batas dari dinding. Sementara *lift force* timbul ketika kecepatan aliran yang mengalir pada kontur bodi mengalami perubahan karena efek *viscous*, sehingga terjadi perbedaan distribusi tekanan antara bagian atas dan bagian bawah dari bodi, dan menghasilkan suatu getaran atau vibrasi ketika perbedaan tersebut berlangsung secara kontinyu. Bodi tersebut akan mengalami *lift force* positif apabila distribusi tekanan di bagian bawah bodi lebih besar dari distribusi tekanan bagian atas, dan sebaliknya menimbulkan *lift force* negatif apabila distribusi tekanan bagian atas bodi lebih besar dari distribusi tekanan bagian bawah. Besar kecilnya *lift force* ditentukan oleh orientasi arah aliran terhadap *bluff body* tunggal atau dalam susunan tertentu, serta geometri dari kontur bodi. Sedangkan *drag force* terjadi ketika aliran yang mengalir pada bodi bagian atas dan bagian bawah tersebut terlepas atau terpisah (separasi) dari bodi. Terlepasnya aliran dari kontur bodi dikarenakan momentum aliran tersebut tidak mampu mengatasi *adverse pressure* dan *skin friction* akibat *shear stress*. Besar kecilnya *drag force* ditentukan oleh kapan terjadinya pemisahan aliran tersebut, dengan kata lain apabila separasi terjadi lebih awal maka *wake region* makin lebar dan berarti *drag force* juga besar, dan sebaliknya apabila separasi tertunda maka *wake region* lebih sempit sehingga *drag force* juga kecil. Faktor-faktor yang menentukan posisi separasi pada silinder sirkular antara lain: kecepatan *free stream* dan profil aliran, *free stream turbulence*, geometri, dan kekasaran permukaan bodi.

Penelitian secara eksperimen maupun visualisasi terkait dengan silinder tunggal dekat dinding sudah banyak dilakukan [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Penelitian secara eksperimen mengamati bentuk pola aliran yang terjadi disekeliling silinder sirkular dan pengaruhnya terhadap karakteristik aerodinamik, seperti *drag* dan *lift coefficient*, dengan memvariasi jarak antara silinder dengan dinding datar, posisi penempatan silinder pada lapis batas. Melalui kajian eksperimen ini diperoleh hasil bahwa variasi rasio gap silinder terhadap dinding berpengaruh terhadap *drag* dan *lift coefficient*, tetapi ketebalan lapis batas dinding lebih berpengaruh

secara signifikan terhadap *drag coefficient*. Sementara melalui visualisasi dapat diidentifikasi perilaku aliran menjadi empat pola yang berbeda, yaitu: terbentuknya *vortex shedding* yang tidak beraturan terutama pada *lower side* dari silinder *wake*, tetapi *outer shear layer* tetap terbentuk secara periodik pada rasio gap yang sangat kecil; mulai ada kombinasi antara *inner shear layer shedding* dari silinder dengan lapis batas dinding pada rasio gap kecil; terbentuknya onset *vortex shedding* dari silinder pada rasio gap menengah; dan tidak terjadi separasi dari lapis batas dinding, juga *upstream* atau *downstream cylinder* pada rasio gap yang besar. Penelitian tentang susunan dua silinder sirkular *tandem* dekat dinding juga telah dilakukan oleh [8] dan [9].

Penelitian berikut ini bertujuan untuk menggambarkan fenomena aliran yang terbentuk di sekeliling susunan empat silinder sirkular dengan konfigurasi *in-line* pada  $L/D = 4$  dekat dinding dengan rasio  $(G/D) = 0,1$  dan  $0,2$  melalui simulasi numerik. Penggunaan metode simulasi numerik sebagai suatu studi awal sangat bermanfaat, karena selain dapat menggambarkan dan memprediksi fenomena yang akan terjadi, juga dapat digunakan untuk mengeksplorasi lebih dalam fenomena atau kejadian yang tidak dapat ditunjukkan melalui eksperimen. Dengan demikian waktu penelitian menjadi lebih singkat dan dapat menghemat biaya dari suatu penelitian, walaupun penerapan metode simulasi inipun memiliki keterbatasan, yaitu adanya ketidakpastian (*uncertainty*) dan pengambilan asumsi ideal.

Medan aliran yang melintasi permukaan silinder sirkular terbagi menjadi *upper side* dan *lower side* di titik separasi. Titik separasi terjadi pada daerah yang tekanannya meningkat (*adverse pressure gradient*). Fluida kemudian akan mengalami separasi karena momentum fluida didekat dinding tidak mampu menghadapi kombinasi gaya *viscous* dan *gradien* tekanan searah aliran. Selanjutnya akan terbentuk *viscous wake*, seperti diilustrasikan oleh Gambar 1.



**Gambar 1.** Pertumbuhan Boundary Layer dan Tekanan Aliran yang Melintasi Permukaan Silinder

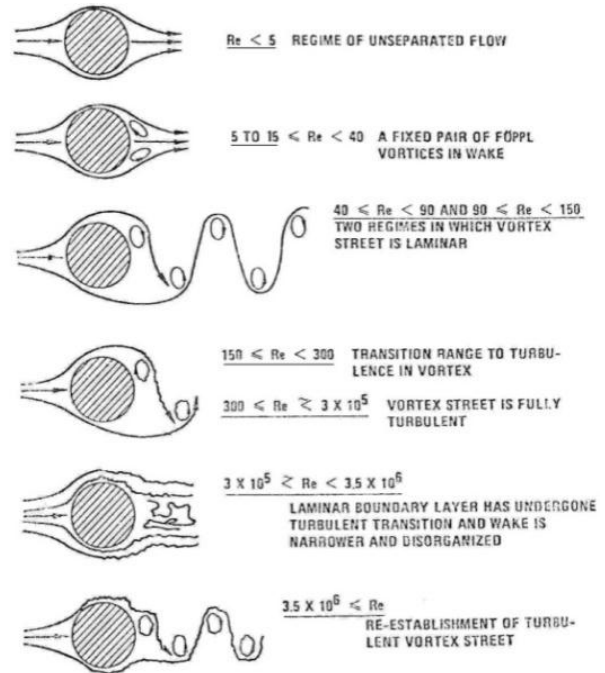
Regime aliran melalui silinder sirkular tunggal yang dipresentasikan oleh Lienhard sebagai berikut:

- Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) yang sangat kecil ( $Re < 5$ ) aliran tidak terseparasi. Seiring dengan peningkatan bilangan *Reynolds*, aliran terseparasi untuk membentuk sepasang resirkulasi eddy pada tiap sisi dari silinder.
- Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) yang semakin meningkat, *shedding eddy* menjadi semakin panjang searah aliran, panjangnya meningkat secara linier terhadap bilangan *Reynolds* sampai aliran stabil pada  $Re \sim 4 \times 10^1$ , *vortices* kemudian terpecah, konsekuensinya periodik *staggered vortex street* terbentuk.
- Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) hingga  $\sim 1,5 \times 10^2$ , *vortex street* bertambah lebar yang berjalan di belakang hingga beberapa diameter. Peningkatan pertama kali dari *wake* yang berkembang menjadi dua baris sejajar *staggered vortices*. Teori inviscid *Von Karman* menunjukkan *vortex street* akan stabil saat rasio lebar dengan jarak *streamwise* adalah 0,28. Pada daerah ini, *vortex street* adalah laminar.
- Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) =  $3 \times 10^2$ , memunculkan lapisan batas laminar yang melalui bagian depan silinder, saat melalui bagian belakang silinder, lapisan terseparasi dan memecah menjadi turbulen *wake*. Dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* ( $3 \times 10^2 \leq Re < 3 \times 10^5$ ) titik separasi akan bergerak ke depan.
- Pada bilangan *Reynolds* sekitar  $3 \times 10^5$ , titik separasi akan bergerak ke belakang hal ini dipengaruhi oleh turbulensi aliran bebas (*free stream*) dan kekasaran permukaan benda, yang ini akan menyebabkan *drag* semakin turun dengan tajam dan *vortex shedding* menjadi tidak beraturan.
- Pada bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi lagi *vortex street* muncul kembali.

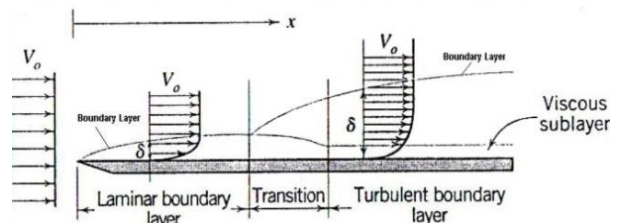
Sementara aliran pada bidang/plat datar merupakan *zero pressure gradient flow*, artinya tidak terjadi perubahan tekanan dalam aliran selama mengalir di atas plat datar. Dengan demikian penyebab dari gradiasi kecepatan di dalam lapisan batas karena adanya tegangan geser pada bidang datar akibat viskositas dari fluida yang mengalir.

Aliran *viscous* di dalam lapisan batas tepat di atas permukaan plat datar kecepatannya sama dengan 0 (nol), atau dikatakan tidak terjadi slip (*no slip condition*) pada bidang tempatnya mengalir. Sampai batas ketebalan tertentu dari permukaan tempat mengalir terjadi gradiasi kecepatan hingga pada suatu titik tertentu dimana kecepatannya sama dengan kecepatan aliran bebas (*free stream*). Perkembangan aliran yang terjadi didalam lapisan batas dapat berupa laminar atau turbulen. Kecepatan aliran laminar dalam lapisan batas adalah  $u$ , sementara kecepatan aliran turbulen didalam lapisan batas adalah merupakan kecepatan rata-rata ( $\bar{u}$ ) ditambah dengan kecepatan fluktuasi

pada tiga komponen ( $u'$ ,  $v'$ , dan  $w'$ ). Lapisan batas yang terjadi pada plat datar apabila dialiri oleh suatu aliran ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Lapisan batas laminar terjadi mulai ujung depan atau *leading edge* diikuti dengan transisi dan akhirnya menjadi turbulen.



Gambar 2. Regime Aliran Melalui Silinder Sirkular [8]



Gambar 3. Lapisan Batas Kecepatan pada Plat Datar [10]

Secara umum faktor-faktor yang mempengaruhi posisi transisi dalam lapisan batas adalah gradien tekanan, kekasaran permukaan solid bodi atau *surface roughness*, perpindahan panas, gaya-gaya bodi atau *body forces*, dan gangguan-gangguan yang diberikan pada *free-stream* atau *free-stream disturbances*.

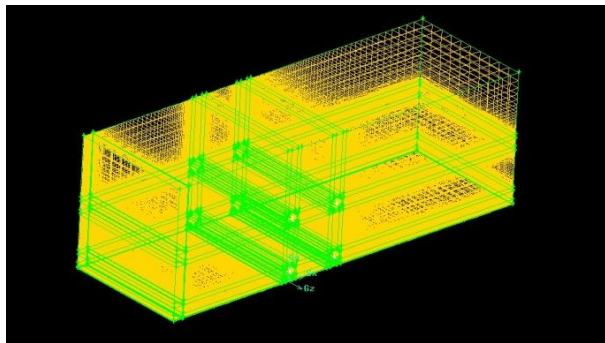
## METODE PENELITIAN

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam simulasi numerik ini adalah: (a) Membuat *geometry set-up* dalam bentuk tiga dimensi (3-D), untuk silinder sirkular pada jarak rasio dengan dinding ( $G/D$ ) = 0,1 dan 0,2, Gambar 4; (b) Membuat *meshing* tiga dimensi dalam bentuk *hexahedron*; (c) Menentukan *boundary condition* dari domain yang dibuat; (d) Memilih teknik untuk iterasi, yaitu menggunakan

*pressure velocity coupling* SIMPLE dan diskretisasi menggunakan *second order upwind* agar menghasilkan akurasi dan stability yang tinggi; (e) Melakukan proses iterasi dengan menggunakan pemodelan U-RANS 3D; (f) Melakukan *post processing* dari hasil iterasi.

Untuk pengecekan *grid independency* dilakukan analisis terhadap berbagai meshing dengan variasi *nodes* dan *face*, dan diperiksa nilai maksimum  $y^+$  ( $y$  plus). Selanjutnya dalam menentukan model viskos yang akan digunakan, dilakukan validasi antara hasil simulasi numerik yang menggunakan berbagai model viskos dan hasil eksperimen pada silinder sirkular tunggal yang ditempatkan di *center line*. Hasil validasi menunjukkan bahwa dari berbagai model viskos U-RANS yang telah dicoba, model viskos  $k-\omega$  SST memiliki hasil yang mendekati eksperimen maupun model numerik LES.

Simulasi numerik di sini menggunakan bantuan *software* FLUENT versi 6.3.26, untuk mengamati karakteristik aliran di sekeliling silinder sirkular. Bentuk geometri diambil 3-D dengan tujuan untuk menyesuaikan dengan eksperimen yang pengukurannya dilakukan pada daerah *midspan*. Karakteristik aliran yang diperoleh melalui simulasi numerik ini meliputi distribusi tekanan (koefisien tekanan  $C_p$ ), visualisasi aliran yang melintasi silinder sirkular (*velocity pathline*).



**Gambar 4.** Meshing 3-D Model Silinder Sirkular Dekat Dinding Menggunakan Hexahedron

Persamaan pengendali pada aliran 3-D, *incompressible flow* dan *unsteady state*:

a. Persamaan konservasi masa:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

b. Persamaan momentum:

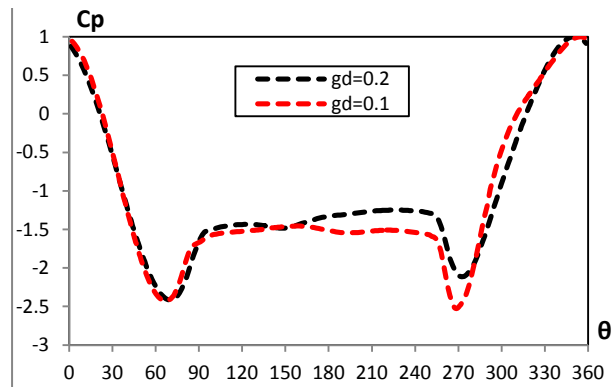
$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2a)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2b)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2c)$$

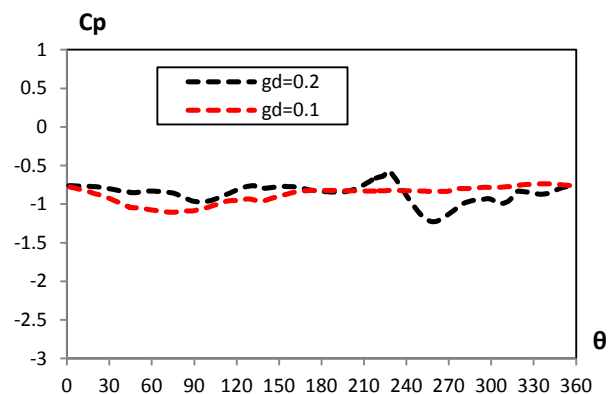
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur plat datar maupun pada silinder sirkular yang diprediksi oleh model turbulensi  $k-\omega$  SST pada kecepatan 13 m/s, atau pada bilangan Reynolds =  $5,3 \times 10^4$ .



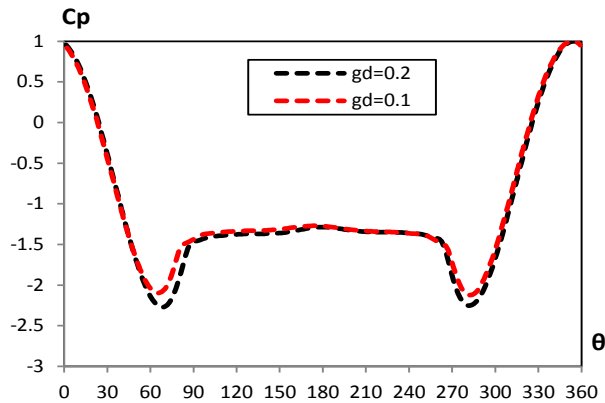
**Gambar 5.** Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan  $L/D = 4$  dan variasi  $G/D = 0,1$  dan  $0,2$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , numerik 3D-URANS

Dari Gambar 5 dapat diketahui pada rasio  $G/D = 0,1$  dan  $G/D = 0,2$ , harga  $C_p = 1$  atau titik stagnasi terjadi pada sudut  $\theta_s = 355^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa aliran yang menuju ke silinder-1 tidak tegak lurus terhadap silinder, karena posisi peletakan silinder dekat dinding menyebabkan terjadinya efek *blockage*, sehingga sebagian besar fluida akan terdefleksi ke *upperside* silinder-1 sehingga terjadi peningkatan akselerasi, yang ditandai dari tekanan minimum yang terjadi pada  $\theta = 70^\circ$  dan separasi terjadi pada  $\theta = 100^\circ$ .



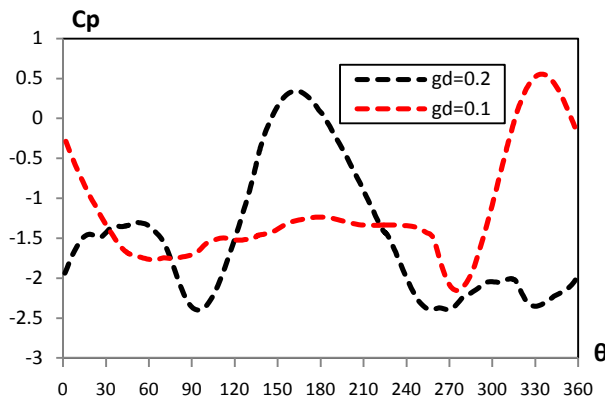
**Gambar 6.** Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan  $L/D = 4$  dan variasi  $G/D = 0,1$  dan  $0,2$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , numerik 3D-URANS

Dari Gambar 6 menunjukkan terdapat distribusi koefisien tekanan  $C_p$  yang memiliki harga yang negatif, hal ini menandakan terjadinya fenomena *shear layer* melingkupi pada kontur silinder-2, terutama pada *frontside-upper* silinder.



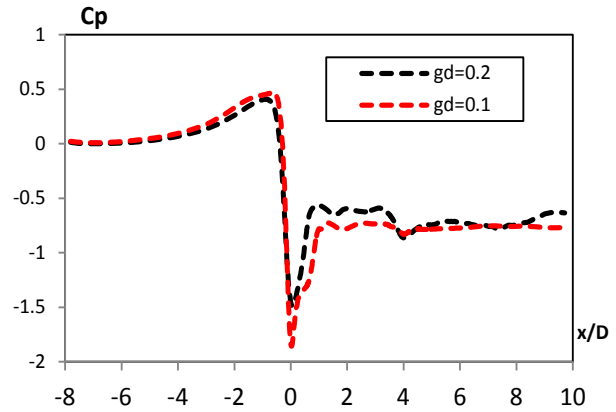
**Gambar 7.** Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan  $L/D = 4$  dan variasi  $G/D = 0,1$  dan  $0,2$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , numerik 3D-URANS

Dari Gambar 7 dapat diketahui bahwa  $C_p = 1$  atau titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s = 355^\circ$ , ini menunjukkan bahwa momentum aliran pada *lowerside* silinder lebih besar dibanding *upperside*, sehingga titik stagnasi bergerak ke bawah menjauhi *frontside*  $\theta_s = 360^\circ$ . Akselerasi aliran pada *upperside* relatif kecil, hal mana ditunjukkan dari tekanan minimum pada  $\theta = 65^\circ$  dan titik separasi  $\theta = 110^\circ$ .



**Gambar 8.** Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan  $L/D = 4$  dan variasi  $G/D = 0,1$  dan  $0,2$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , numerik 3D-URANS

Dari Gambar 8 dapat diketahui bahwa distribusi koefisien tekanan  $C_p$  untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder dilingkupi oleh *shear layer*. Sementara pada *lowerside front* terjadi *reattachment* dari *shear layer*.



**Gambar 9.** Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Plat Datardekat susunan empat silinder sirkular *in-line square* dengan  $L/D = 4$  variasi  $G/D = 0,1$  dan  $0,2$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , numerik 3D-URANS

Gambar 9 menunjukkan distribusi koefisien tekanan sepanjang dinding yang diamati dari  $-8.75 \leq x/D \leq 9.6$ . Keberadaan *upstream* silinder-1 dan *downstream* silinder-2 yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* dari silinder dan dinding, ini ditandai dengan harga  $C_p < 1,0$ ,  $G/D = 0,1$ . Ketika aliran melalui celah mengalami akselerasi, yang ditandai dengan dua nilai tekanan minimum ( $C_p$  negatif) pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan yang positif ini recovery menjadi *static pressure* pada  $x/D \geq 9$ , dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

## KESIMPULAN

Distribusi koefisien tekanan pada silinder-1 menunjukkan distribusi yang tidak simetri terutama pada seluruh rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , yang ditandai dengan tidak adanya posisi titik stagnasi  $C_p = 1$  pada *front side*. Ini dikarenakan posisi silinder-1 yang dekat dengan dinding datar, sehingga timbul efek *blockage* dan menyebabkan sebagian besar fluida mengalir ke *upperside* silinder-1. Perpindahan fluida juga membawa penambahan momentum pada aliran diantara silinder-1 dan silinder-3, yang ditandai dengan posisi titik separasi yang bergerak ke *frontside* dari silinder-3 dengan bertambahnya rasio gap. Koefisien *base pressure* pada silinder-1 menurun dengan bertambahnya rasio gap  $G/D$  hal ini sesuai dengan penelitian [1].

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ramamurthy, A.S. and Lee, P.M., Wall Effects on Flow past Bluff bodies, *Journal of Sound and Vibration*, 31(4), 1973, pp. 443-451.

- [2] Lei, C. *et al.*, Re-examination of the Effect of a Plane Boundary on Force and Vortex shedding of a Circular Cylinder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80, 1999, pp. 263-286.
- [3] Choi, J.H. and Lee, S.J., Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluids and Structures*, 14, 2000, pp. 697-709.
- [4] Price, S.J. *et al.*, Flow Visualization Around a Circular Cylinder Near to a Plane wall, *Journal of Fluids and Structures*, 16, 2002, pp. 175-191.
- [5] Lin, *et al.*, *Flow Characteristics Around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary*. 16<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena, Prague, 2005.
- [6] Nishino, T. *et al.*, Unsteady RANS and Detached-eddy Simulations of Flow Around a Circular Cylinder in Ground Effect, *Journal of Fluids and Structures*, 24, 2008, pp. 18-33.
- [7] Wang, X.K. and Tan, S.K., Near Wake Flow Characteristics of a Circular Cylinder Close to a Wall, *Journal of Fluids and Structures*, 24, 2008, pp. 605-627.
- [8] Yuwono, T., Fahreza, F., and Widodo, W.A., Flow Around Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement Near a plane Wall, *Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Bali: February 9-10, 2010.
- [9] Widodo, W.A., Simulasi Numerik Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular Tersusun Tandem dengan Pengaruh *Side Wall* dengan Jarak gap ( $G/D = 0,2$ ), *Laporan Penelitian*, ITS, Surabaya, 2008.
- [10] Fox, Robert, W. and McDonald, Alan, T., *Introduction to Fluid Mechanics*, Seventh edition: SI version, John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 2010.